

飞行器新结构技术展望



马野,宋盛菊,刘焱飞

中国运载火箭技术研究院研究发展中心, 北京 100076

摘 要:随着飞行器设计需求的提升,飞行器结构不断向结构功能一体化、智能化等方向发展,飞行器新结构技术是飞行器结构发展需求的体现。本文从飞行器结构设计技术发展的维度出发,着重对近几十年来出现的飞行器结构创新概念及理念进行了汇总和整理,形成了对航空航天飞行器结构技术发展趋势的研判,分别从轻质/多功能结构、智能结构、变形/变体结构、仿生材料/结构和防隔热承载一体化结构5个方面展开介绍和分析,最后给出对航空和航天飞行器结构技术发展趋势的总结,这些结论可对后续飞行器结构设计专业的发展提供有益借鉴。

关键词:飞行器结构; 航空器; 航天器; 发展趋势

中图分类号:V19

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.11.009

需求牵引是飞行器设计的创新源头,可以说一代需求牵引一代装备,飞行器结构设计也是如此。传统的飞行器结构设计要求主要包括轻质、安全、可维护和低成本等,对于航天飞行器结构设计,在上述要求的基础上,还重点强调耐高温、防隔热承载一体化和可重复使用等特性,这些要求是飞行器结构设计的基本要求。随着人类科技的进步以及新需求的牵引,面向未来的飞行器面临更高的要求,在结构设计方面主要体现为隐身、智能、多功能和可变构型等,这些需求将不断牵引飞行器结构技术向更高的水平发展。

纵观飞行器百年发展历程,人类发明了各式各样的飞行器,在尺寸、速域、空域及功能上都不尽相同,从结构形式、使用载荷条件及应用环境上来看也是千差万别。因此,飞行器结构涉及到的范畴比较广泛,结构形式也多种多样,结构设计的方法及理念也在不断发展,难以统一归类和归纳,但从飞行器结构技术发展趋势上来看,当前已形成了一定的潜在方向,如图1所示,相信也必将成为未来飞行器结构技术发展的主要趋势和方向。

飞行器结构的发展趋势是飞行器结构发展需求和技术推动的共同结果,趋势一旦形成,也会促进飞行器结构的更快发展,尤其是在当前飞行器设计空天结合的大背景下。本文从飞行器结构技术发展维度出发,着重对近几十年来出现的飞行器结构创新概念及理念进行了汇总和整理,形成了对航空航天飞行器结构技术发展趋势的研判,这些结

论可对后续飞行器结构专业的发展提供有益借鉴。鉴于很多潜在的发展概念在内容上存在相互重叠,无法严格界定和区分,本文整理的内容也会存在一定的交叉,分别从轻质/多功能结构、智能结构、变形/变体结构、仿生材料/结构和防隔热承载一体化结构5个方面进行论述。

1 轻质/多功能结构

轻质是飞行器对结构的最基本要求。为了实现飞行器对结构的轻质化要求,人们采取了多种途径:在材料选择上,先后出现了铝合金、钛合金及复合材料的应用,材料应用已多种多样;在工艺路线上,金属材料的加工不再仅是传统的减材制造,出现了增材制造,甚至复合材料也发展了增材制造结构;在结构形式上,也不再是传统的结构设计形式,出现了拓扑优化结构、点阵结构等形式。为了提高飞行器的结构效率,必须采取创新性思维拓展结构设计理念,开拓结构设计方法,提升结构设计潜力。

王向明等^[1-2]主要基于金属增材制造技术,提出了飞行器结构大型整体化、梯度复合化、构型拓扑化和结构功能一体化等概念,具有高减重、长寿命、多功能、低成本和快速响应等优势,在我国新型飞机结构设计应用中发挥了重要作用。

先进复合材料一经出现,便凭借着它优异的力学性能和重量优势迅速成为飞行器结构的主要材料,占比呈逐年

收稿日期:2023-05-18; 退修日期:2023-08-05; 录用日期:2023-09-07

引用格式: Ma Ye, Song Shengju, Liu Yanfei. Prospect of new structure technology for flight vehicle[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(11):63-74. 马野,宋盛菊,刘焱飞. 飞行器新结构技术展望[J]. 航空科学技术, 2023, 34(11):63-74.

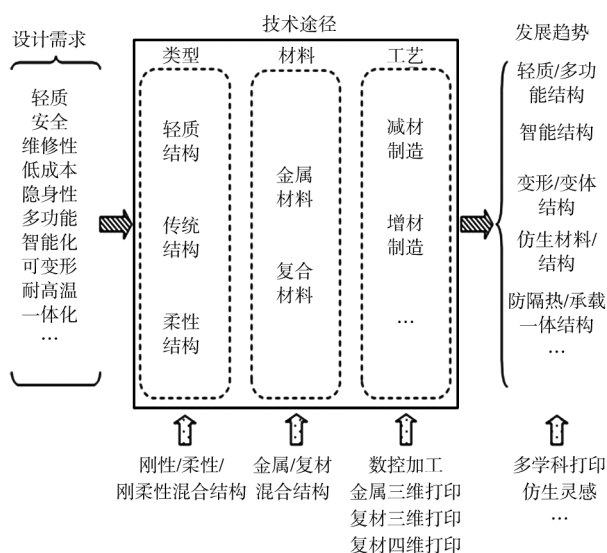


图1 飞行器结构技术发展趋势

Fig.1 Developing trend for structure technology of aircraft

递增趋势,甚至一度成为评判飞行器先进程度的标准^[3-4]。由于复合材料的可设计性,赋予了它更灵活的设计空间,其在飞行器结构设计领域的应用必将越来越广泛^[5-7],尤其是随着增材制造技术、智能材料技术的发展,先进复合材料也必将成为持续热点技术^[8],目前的结构技术发展已然体现出这种趋势。图2为先进复合材料的一些示例。

无论是金属材料还是复合材料,飞行器结构在保证轻

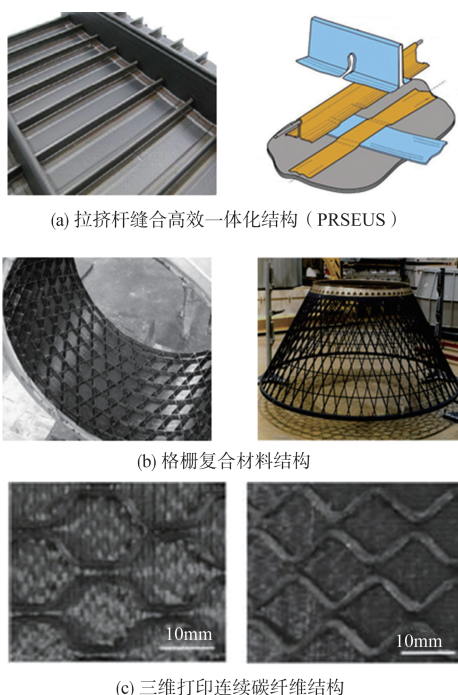
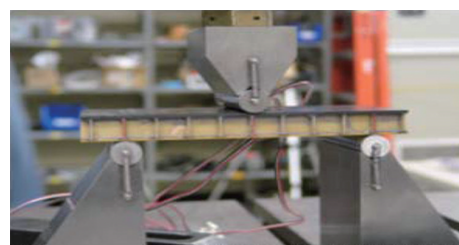


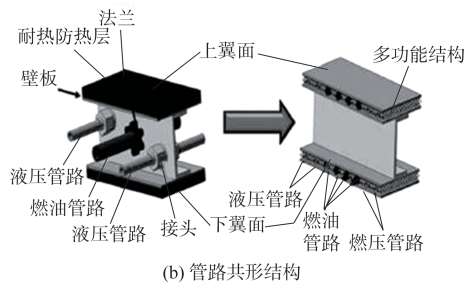
图2 先进复合材料结构示例

Fig.2 Examples for advanced composites

质的前提下,还应尽可能地承担更多的功能需求,使飞行器结构能够承担更多的角色,发挥更大的作用。随着三维打印等加工制造工艺技术的提高,使得轻质/多功能结构的实现变得越发可行,当前已经出现的工程应用包括天线共形结构^[9]、管路共形结构^[2]、隐身材料结构^[10-11]和“零质量”电池储能结构^[12]、智能健康监测结构等,如图3所示。



(a) 天线共形结构



(b) 管路共形结构



(c) 隐身材料



(d) 储能电池结构

图3 多功能结构示例

Fig.3 Examples for multifunctional structure

2 智能结构

智能结构的概念主要包括智能健康监测结构、智能变

形结构(与变形/变体结构有交叉,见第3节)、智能修复结构(与仿生材料/结构有交叉,见第4节)等。

智能健康监测结构是飞行器结构与结构健康监测(SHM)相结合的多学科技术,如智能蒙皮概念。目前,很多先进的飞行器均安装有健康监测系统,通过智能传感器阵列布置于飞行器结构指定位置(可在制造环节将传感器植入结构内部,形成一体化结构),可实时动态监控飞行器结构的健康状况,图4给出了一些智能传感器和光纤传感器示例^[13-15]。

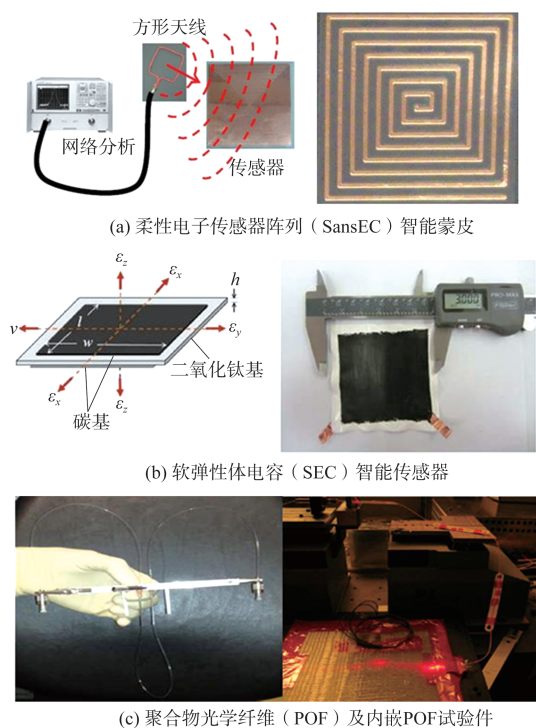


图4 智能传感装置示例

Fig.4 Examples for smart sensor

3 变形/变体结构

如果变形仅是指飞行器在飞行过程中的构型发生改变,那么变形并不是一个新概念^[16],飞机正是通过对襟翼、副翼和尾翼等的操控来实现对飞行过程的控制。从技术发展的时间维度来看,飞机的变形也不是一个新概念,可以说从飞机诞生之初就已经存在,一百多年来,飞机设计师和工程师们将各式各样的飞机变形方式都变成了现实,形成了大量的难以完全统计的飞机方案或验证方案,图5仅统计了历史上最典型的飞机和技术验证概念^[16-42]。可以看出,飞行器的变形主要是指机翼的变形,机身的变形案例尚不多见(当然,对于翼身融合体或乘波体构型,机翼和机身的区分并不明显),

机翼变形又以变弯度(扭度)、变后掠、变上反(折叠)和变展长这4种变形模式为重点发展方向。本文所涉及的变形结构主要是指飞行器在飞行过程中可以完成变形的结构,因此折叠式的舰载机并不在本文的讨论范畴内。

主动气动弹性机翼(AAW)概念最早约出现于1974年,通过前缘襟翼改变机翼的弯度进行总体动力学测试。最近的AAW测试出现在2002年,其基于F-18飞机,通过前缘襟翼和副翼形成机翼扭转来测试飞机在跨声速和超声速的滚转控制^[16,20],如图6所示。

任务适应性机翼(MAW)概念出现于20世纪70年代末期,基于F-111飞机,该机型的机翼可实现变后掠、变前缘和变后缘弯度^[21-22]。由图7可知,其前、后缘结构为多级铰链结构,尤其是后缘结构较为复杂,通过多级铰链可以实现较单级铰链更为顺滑和复杂的舵面变形模式,因此可以提升全飞行包线的性能。MAW概念对后续飞行器设计产生了较大的影响,直到现在该概念依然是设计的主流思想。

智能机翼(Smart Wing)概念出现于20世纪90年代初。为了促进智能机翼的研究,智能材料和结构—智能机翼项目分为两个阶段:第一阶段以形状记忆合金(SMA)驱动的无铰链式的后缘操纵面和以SMA扭力管实现机翼扭转为主要应用特征,并开展了基于16%缩比模型的风洞试验测试,如图8所示;第二阶段以SMA驱动的前、后缘和以超声压电驱动的后缘为主要应用特征,并开展了全翼展的30%缩比无人驾驶飞行器(UCAV)模型的风洞试验^[23-27]。

进入21世纪以后,更多的关于飞行器变形结构的新材料、新技术、新概念和新理念如井喷式涌现,呈现出全面开花的局面,相较于完整的统计和展示,本文仅对一些有典型代表意义的技术验证概念进行介绍,如图9所示。

“下一代”(NextGen)项目起源于2003年的下一代变形飞行器结构(N-MAS)计划,要求“下一代”飞行器具备大几何变形能力(包括200%展弦比变化、40%展长变化和70%机翼面积变化等),同时还需满足飞行控制、变形效率和结构承载等要求,最终选定了蝙蝠翼(batwing)构型并开展了风洞试验研究和飞行试验(MFX-1)^[28-30]。自适应柔性后缘舵(ACTE)项目源于FlexSys公司的小企业创新研究(SBIR)项目,在2009年对湾流III型客机进行改制,采用柔性结构技术实现无缝式柔性后缘舵,完成了动力学积木式试验验证,并于2015年开展了飞行试验测试^[31-35]。柔性结构技术可以帮助飞行器实现结构减载,提升操纵面的效率并减少噪声。智能飞行器结构机翼(SARISTU)为空客公司组织欧洲16个国家64个参与者在2011—2015年开展的

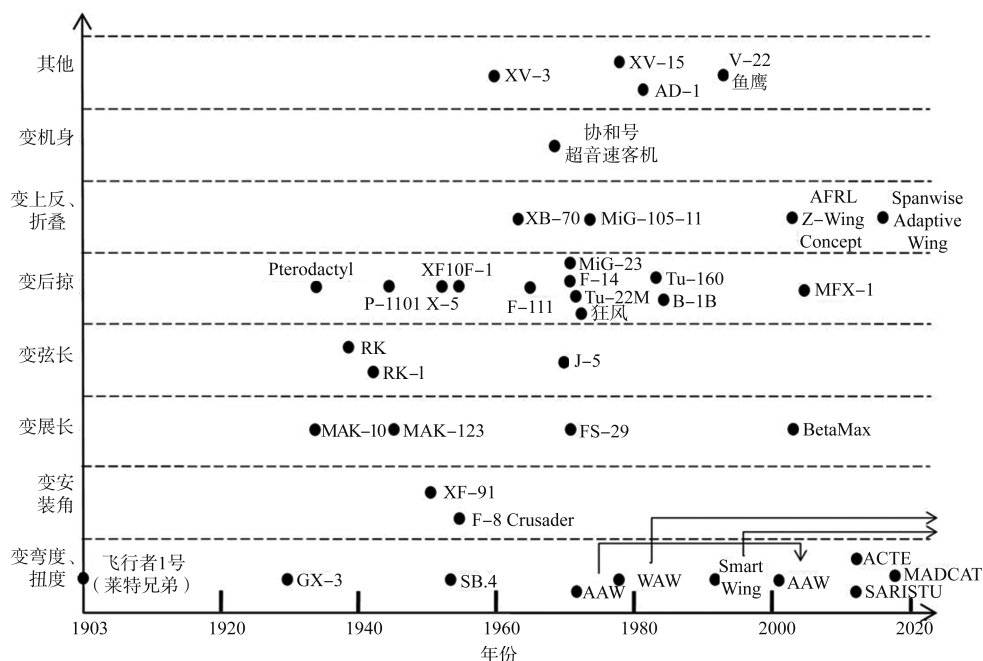


图5 部分变形方式的飞机和验证概念

Fig.5 Some sorts of morphing airplane and concept

大型合作项目,集成了机翼翼段产品并完成了风洞试验考核。该项目旨在通过适应性机翼前、后缘和集成传感器等技术提升飞行器结构配平能力,提高气动控制效率,减少燃油消耗和噪声^[36-39]。适应性后缘装置(ATED)是该项目的一个主要分项目。展向自适应机翼(SAW)是由美国国家航空航天局(NASA)组织开展的应用SMA进行机翼展向折叠的技术验证项目,于2017年12月利用缩比验证机完成了利用SMA折叠机翼的试飞^[40-41],2018年8月成功地利用SMA实现一架F-18飞机全尺寸机翼翼段的地面折叠试验,该项研究工作仍在开展之中。任务适应性数字复合材料结构技

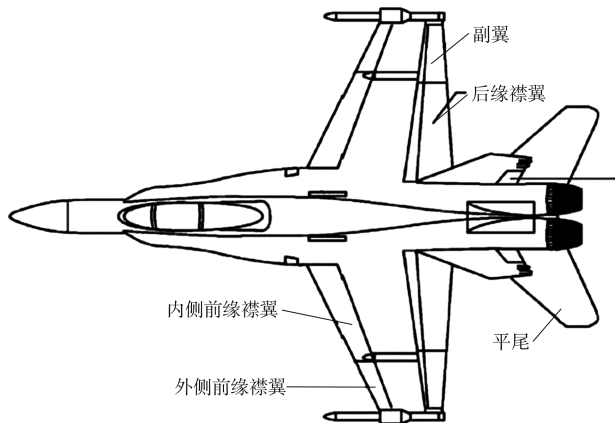


图6 基于F-18飞机的AAW

Fig.6 AAW based on F-18

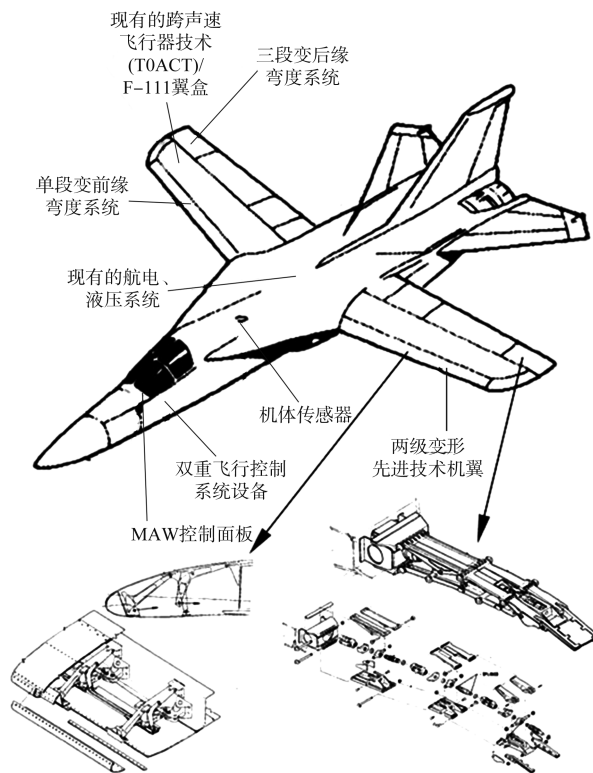


图7 基于F-111飞机的MAW

Fig.7 MAW based on F-111

术(MADCAT)项目由NASA组织开展,2016年研制出“积木式”柔性机翼的小尺寸验证机,并完成风洞试验和飞行试

验^[17,42]。2019年,开展了全尺寸样机的设计、制造和风洞试验工作,表明这种“积木式”构型可以按飞机设计要求实现定制化设计。

除上述变形结构实践外,还有非常多的变形结构概念和理念,如变形结构基本围绕着形状记忆特性材料(SMA、SMP、SMT等)、压电陶瓷材料(AFC、MFC等)、柔性结构(包括柔性胞元结构、柔性蒙皮、类折纸式结构等)和仿生翼(一般为小型飞行器)等,很多概念和方案已处于实验室阶段或飞行试验阶段,但这部分内容十分丰富,且形式多样、创新性强,难以简单概述,图10仅给出了一些变形概念的图示^[43-48]。关于变体飞机的智能结构技术,参考文献[49]给出了更加详细的论述,本文不再介绍。

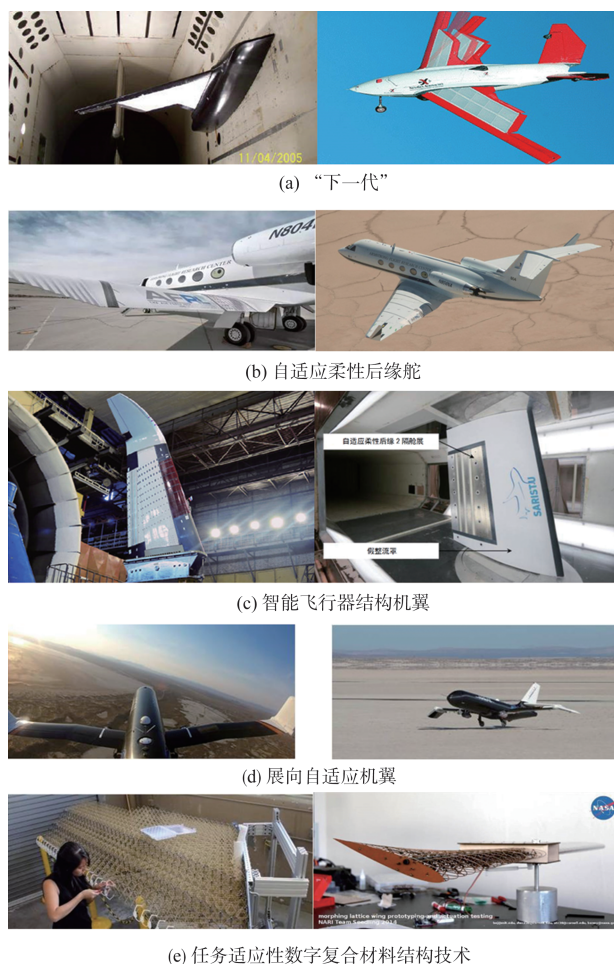


图8 以F-18飞机为示例的Smart Wing应用

Fig.8 Smart Wing examples based on F-18

对于变形/变体飞行器而言,变形/变体结构需要回答两个问题:(1)为什么要变形,需要什么样的变形,变形能够带来哪些好处?(2)如何从技术上实现这种变形,技术成熟度如何,费效比如何?首先,飞行器变形的出发点一定要是任务上的需求或者能够给飞行带来更优的结果,如减阻、降噪、低碳环保等;其次,如何从技术上实现这种变形也是非常重要的,不同的技术路线选择或许可以达到同样的变形效果,但技术成熟度、费效比却不相同,在工程上所采用的方案往往更倾向于折中的选项。

一个高效的变形结构技术须考虑三个工程需求,即轻质结构、承载能力及变形能力。如图11所示,大部分的变



(e) 任务适应性数字复合材料结构技术

图9 典型的变形机翼示例

Fig.9 Typical morphing wing examples

形结构概念能够满足其中两个方面的需求,少有能够同时实现三个方面需求的结构概念^[50]。从一定程度上来看,这三个方面的需求在工程上的交集似乎并不好实现,需要采取创新性思维来引导设计。同时,图11也能出了三个重要的结构概念,即传统结构、轻质结构和柔性结构。相对于传统结构,轻质结构以典型的高强度结构材料应用为代表,但结构过于刚硬;柔性结构以可接受弹性大变形为主要特征,但结构过于柔性、灵活。变形结构的目的在于通过合理的工程设计,平衡并兼顾轻质、承载和变形要求,取得相对于传统结构更有利的技术进步和工程应用。

4 仿生材料/结构

仿生材料/结构源于大自然的生物结构,它可以给人们带来设计上的灵感,并使人们少走弯路,帮助人们实现更优的设计。因此,将生物结构的一些结构特征应用于飞行器

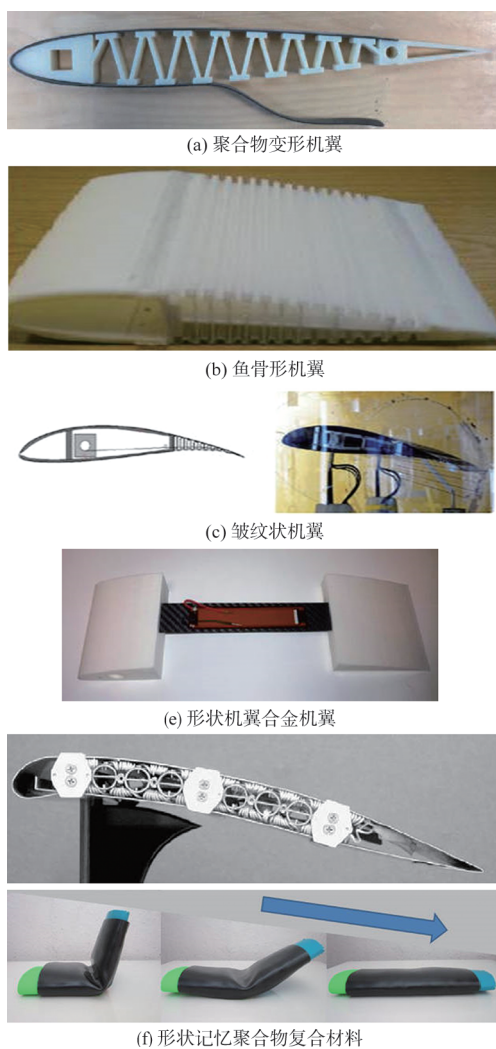


图10 一些变形结构概念

Fig.10 Some concepts of morphing structures

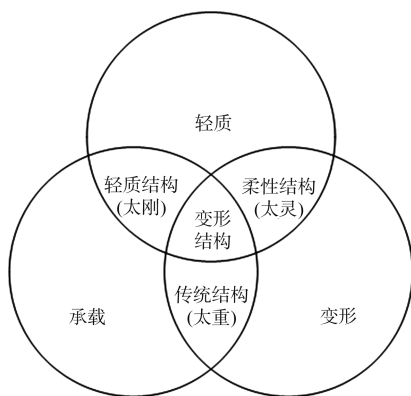


图11 变形结构面临的工程挑战

Fig.11 Engineering challenges on morphing structure

材料和结构设计是一种自然而然的想法,近些年逐渐出现了一些基于仿生的材料/结构的研究,并且越发成为热点。

生物结构经历了进化的自然选择,是一种非常合理的存在。丹麦技术大学学者通过超级计算机,基于拓扑优化方法,对民航飞机的机翼进行拓扑优化,最后发现拓扑优化的整体机翼内部结构与鸟类的喙部骨骼内部结构有异曲同工之妙^[51],如图12所示。

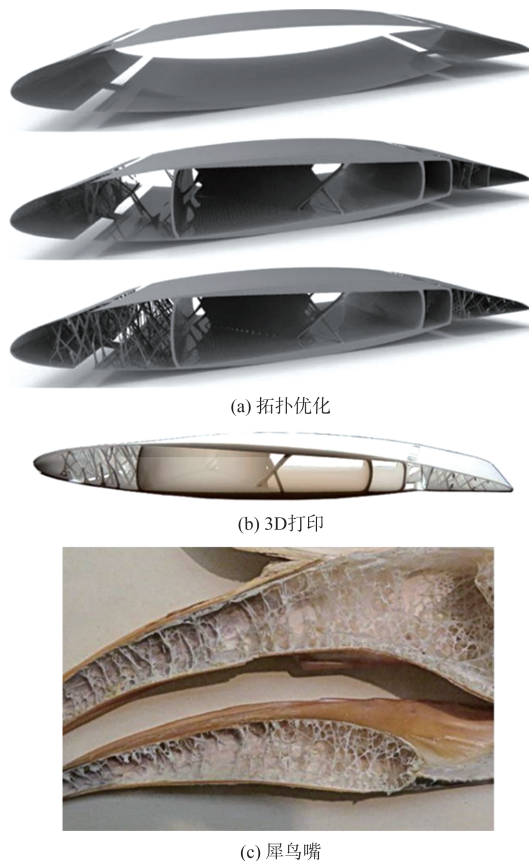


图12 拓扑优化、3D打印与犀鸟喙对照

Fig.12 Comparison between morphogenesis evolution, 3D printing and to the hornbill bird beak

在飞行器结构设计上,人们可以直接借鉴鸟类或者昆虫的飞行原理以及结构形式来设计仿生飞行器^[52-55],但这种飞行器一般为小型的扑翼式飞行器或折叠翼飞行器,这方面国内外的研究非常多,是近几年研究的热点方向,图13仅给出了一些仿生飞行器概念的图示^[52,55]。

人们也可以在飞行器的材料设计上借鉴并利用仿生的一些有益特性形成新材料,如仿生材料具有良好的增韧性能^[56]、耐冲击吸能特性^[57]和材料自愈性^[58],然而这部分内容目前来看创新性也较强,距离形成有效的飞行器结构工程应用可能还尚需时日,但这种趋势已然出现。图14给出了一些仿生材料概念的图示。

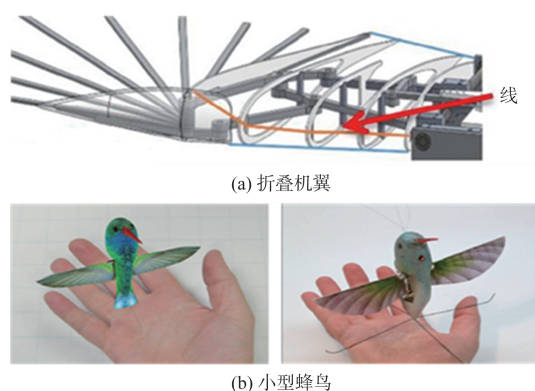


图 13 一些仿生飞行器概念

Fig.13 Some concepts of bio-inspired aircraft

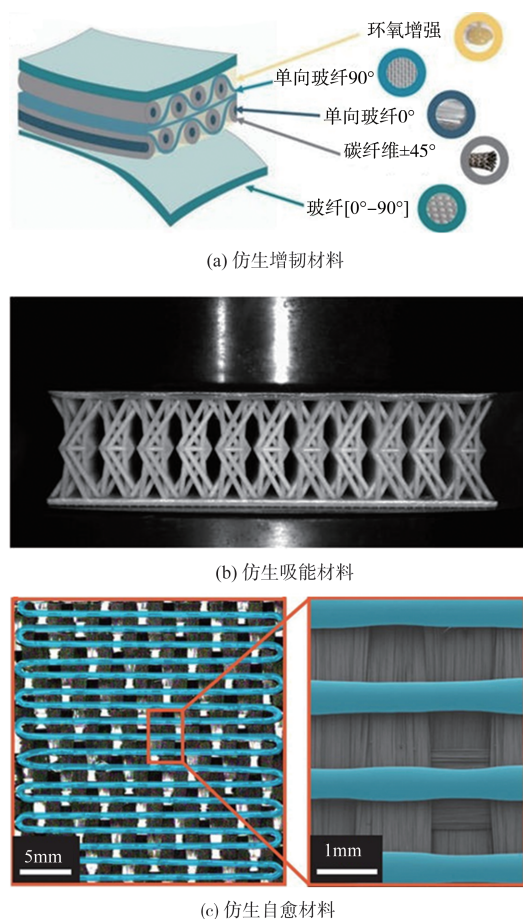


图 14 一些仿生材料概念

Fig.14 Some concepts of bio-inspired material

5 防隔热承载一体化结构

空天飞行器的结构与热防护系统向一体化方向发展的趋势已越发显著^[59-60]。如图 15 所示,从 20 世纪美国的航天飞机刚性陶瓷瓦开始^[61],美国和欧洲对空天飞行器的热防

护系统(TPS)进行了持续的研究。X-33 的研制提出了金属 TPS 的应用,其采用机械连接方式,提高了可靠性^[62-63]。X-37B 的热防护结构为防/隔热一体化概念,其基于航天飞机 TPS 技术,提出整体增韧抗氧化复合材料(TUFROC)方案,采用梯度处理涂层和抗氧化难熔碳瓦,具有耐高温、耐久性好和轻质化的效果,同时通过提高结构系统使用温度来降低热防护系统的重量,提升了维修性,进一步减少了系统重量,体现出一体化的优势^[64-69]。过渡试验飞行器(IXV)的盖板式热防护结构相对于航天飞机已体现出易维护和一体化优势^[70-72],为了应对更高的温度条件,欧洲航天局的 IXV 采用了陶瓷盖板式 TPS,通过特殊的应变支架实现变形协调和密封^[73],易于更换和维护。云霄塔(SKYLON)组合动力飞行器提出了一种“贮箱+立体网架+隔热+防热”的功能一体化结构设计理念,使得其结构系数达到 0.164(理论值)^[74-76],其创新性地提出了复合材料空间立体网架结构以代替传统的机体结构,通过其贮箱和网架结构共同承载,充分挖掘了各结构件的潜能,并与防/隔热结构实现功能性的一体化设计,进而在理论上达到了减重的显著效果^[77]。但云霄塔的这种网架结构由于在节点处与金属接头采用了黏结的连接方式,存在低温力学性能不佳和疲劳强度不足的问题^[76-77],容易在网架结构复合材料杆件最外层出现纤维断裂和分层失效,针对这些问题,新型的碳纤维杆件也在研究中,并已完成阶段性试验^[78],值得持续关注。此外,双层夹芯防/隔热承载一体化结构、轻质夹层多功能结构、轻质多层热防护结构等也是当前国内外研究的热点^[79-81],该类型结构具有防/隔热和承载的综性性能。综上所述,防/隔热和承载一体化设计具有显著的优势,是未来值得关注的发展方向。因此,防/隔热和承载一体化结构设计概念是未来提升空天飞行器总体性能的关键,开展结构与热防护系统的一体化设计研究具有重要的意义。

6 结束语

本文分别从以上 5 个方面阐述了飞行器新结构技术的一些发展趋势,综合来看,这些趋势代表了飞行器结构未来发展的一些方向,但很多技术尚处于探索阶段,到具体应用可能还有很长时间。另外,新结构技术仅是一个时间上的相对概念,而且新结构技术的出现并不能代替现有结构技术,但可以作为现有结构技术必要的补充。可以推测后续飞行器结构主要的发展趋势包括如下几个方面:(1)从学科发展趋势来看,飞行器结构设计已由专业独立的学科不断向交叉学科方向发展,更加智能化、多功能化,且逐渐会

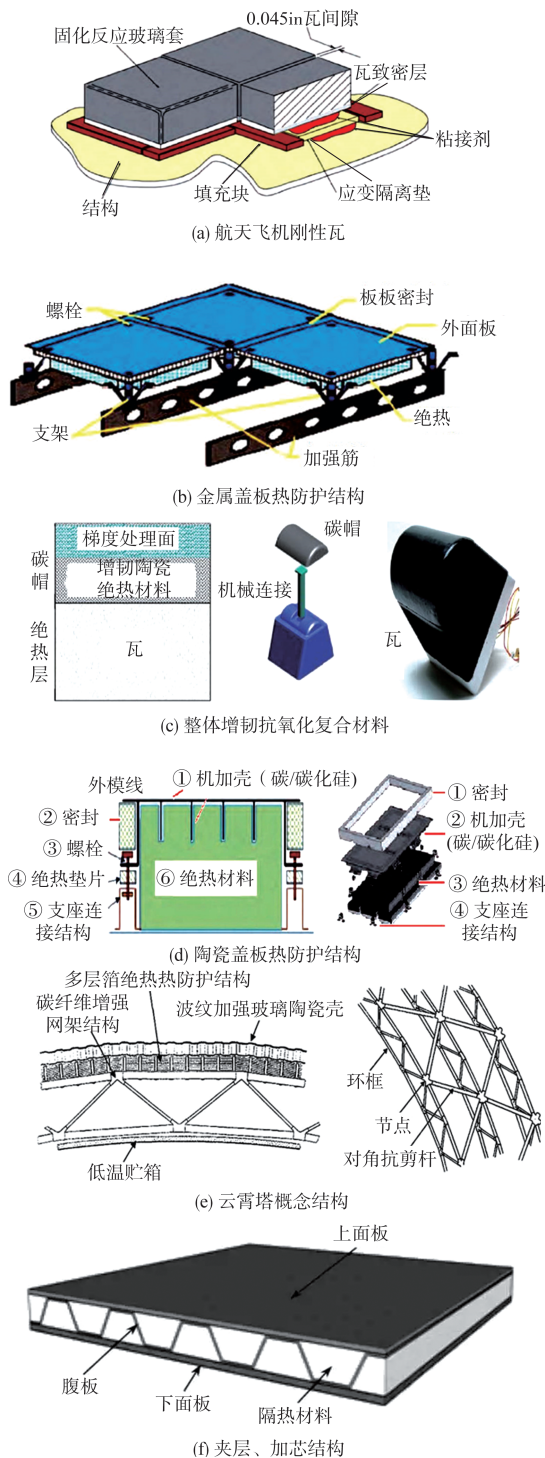


图15 典型热防护概念示意图

Fig.15 Typical TPS concept diagram

带入更多的仿生和多学科特性;(2)从结构承载特性来看,飞行器结构的发展经历了从一开始的柔性结构到轻质刚性结构(金属、复合材料及混合结构),再到轻质—柔性混合结构方向的发展;(3)变形/变体飞行器一直是国外研发的重

点,国外在刚性变体飞行器已有大量应用,柔性变体飞行器也在持续研发,而我国在变形/变体飞行器上尚没有成熟的型号应用,因此基于多任务模式的变形/变体飞行器应是我国后续发展的重点方向之一;(4)防隔热/承载一体化结构技术是航天飞行器结构未来发展的重要方向之一,随着航天飞行器向可重复使用、多任务化、高效化等方向发展,这一技术也必将越来越受到重视。

AST

参考文献

- [1] 王向明. 飞机新概念结构设计与工程应用[J]. 航空科学技术, 2020, 31(4):1-7.
Wang Xiangming. New concept structure design and engineering application of aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(4):1-7.(in Chinese)
- [2] 吴斌, 崔灿, 胡宗浩, 等. 未来战斗机对结构创新设计/制造一体化技术的发展需求[J]. 飞机设计, 2019, 39(2):1-4.
Wu Bin, Cui Can, Hu Zonghao, et al. Future fighters' development needs for structural innovation design manufacturing integration technology[J]. Aircraft Design, 2019, 39 (2) : 1-4. (in Chinese)
- [3] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1):1-12.
Du Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12. (in Chinese)
- [4] 陈绍杰. 论我国先进复合材料产事业的发展[J]. 高科技纤维与应用, 2013, 38(1):1-11.
Chen Shaojie. The development of advanced composite enterprises and institutions in China[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2013, 38(1):1-11.(in Chinese)
- [5] Alex V, Dawn J. PRSEUS development for the hybrid wing body aircraft[C]. 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operation Conference, 2011.
- [6] Fan Huakin, Fang Daining, Chen Liming, et al. Manufacturing and testing of a CFRC sandwich cylinder with Kagome cores [J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(15-16): 2695-2700.
- [7] Vasiliev V V, Razin A F, Totaro G, et al. Anisogrid conical adapters for commercial space application[R]. AIAA 2005-3440, 2005.

- [8] Sugiyama K, Matsuzaki R, Ueda M, et al. 3D printing of composite sandwich structures using continuous carbon fiber and fiber tension[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018,113:114-121.
- [9] Banks D, Berden M, Baron B, et al. Structurally integrated X-band array development[Z]. Boeing Company, 2006.
- [10] Liu Y, Gu S, Luo C, et al. Ultra-thin broadband metamaterial absorber[J]. *Applied Physics A*, 2012, 108:19-24.
- [11] Bian Borui, Liu Shaobin, Wang Shenyun, et al. Novel triple-band polarization-insensitive wide-angle ultra-thin microwave metamaterial absorber[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114:194511.
- [12] Asp L E, Bouton K, Carlstedt D, et al. A structural battery and its multifunctional performance[J]. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 2021, 2(3):2000093.
- [13] Beller Y K, Whitford J, Dudley K, et al. A study on smart SancEC skin sensing for real-time monitoring of flexible structures[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(7):2836-2844.
- [14] Sari K, Simon L, Song Chunhui, et al. Smart sensing skin for detection and localization of fatigue cracks[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015,24(6):065004.
- [15] Michael K, simon K, Oliver B, et al. Fabrication and characterization of Bragg gratings in perfluorinated polymer optical fibers and their embedding in composites[J]. *Mechatronics*, 2016, 34: 137-146.
- [16] Jha A K, Kudva J N. Morphing aircraft concepts, classifications and challenges[C]. *Smart Structure and Materials 2004: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, 2004:213-224.
- [17] Chu Lingling, Li Qi, Gu Feng, et al. Design, modeling, and control of morphing aircraft: A review[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(5):220-246.
- [18] Terrence A W. Morphing aircraft technology: new shapes for aircraft design[R]. RTO-MP-AVT-141, 2006.
- [19] Mason W H, Robertshaw H, Inman D J. Recent experiments in aerospace and design engineering education[C]. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2004.
- [20] Diebler C G, Cumming S B. Active aeroelastic wing aerodynamic model development and validation for a modified F/A-18A airplane[R]. NASA/TM-2005-213668, 2005.
- [21] Gilbert W W. Mission adaptive wing system for tactical aircraft [J]. *Journal of Aircraft*, 1981, 18(7):597-602.
- [22] Gilbert W W. Development of a mission adaptive wing system for a tactical aircraft[R]. AIAA-80-1886, 1980.
- [23] Kudva J N, Appa K, Van Way C B, et al. Adaptive smart wing design for military aircraft: Requirements, concepts and payoffs [C]. *Smart Structures and Materials 1995: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, 1995.
- [24] McGowan A R, Wilkie W K, Moses R W, et al. Aeroservoelastic and structural dynamics research on smart structures conducted at NASA Langley Research Center[C]. *Smart Structures and Materials 1998: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, 1998.
- [25] Florance J R, Burner A W, Fleming G A, et al. Contributions of the NASA Langley Research Center to the DARPA/AFRL/NASA/Northrop Grumman smart wing program[C]. 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2003.
- [26] Kudva J N, Sanders B, Florance J P, et al. The DARPA/AFRL/NASA smart wing program-final overview[C]. *Smart Structures and Materials 2002: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*. SPIE, 2002.
- [27] Kudva J N, Martin C A, Scherer L B, et al. Overview of the DARPA/AFRL/NASA smart wing program[C]. *Smart Structures and Materials 1999: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*. SPIE, 1999.
- [28] Andersen G R, Cowan D L, Piatak D J. Aeroelastic modeling, analysis and testing of a morphing wing structure[C]. 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2007.
- [29] Flanagan J S, Strutzenberg R C, Myers R B, et al. Development and flight testing of a morphing aircraft, the NextGen MFX-1[C]. 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2007.
- [30] Bowman J, Sanders B, Cannon B, et al. Development and next generation morphing aircraft structures[C]. 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2007.
- [31] Miller E J, Holguin A C, Cruz J, et al. Strain gage load

- calibration of the wing interface fittings for the adaptive compliant trailing edge flap flight test[C]. 52nd Aerospace Sciences Meeting, 2014.
- [32] Herrera C Y, Spivey N D, Lung S. Aeroelastic response of the adaptive compliant trailing edge transition section[R]. AFRC-E- DAA-TN27183, 2016.
- [33] Baumann E, Waggoner E R. Flight and ground operations in support of airframe noise reduction tests[C]. 2018 AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2018.
- [34] Kota S, Flick P, Collier F. Flight testing of the flexfoil adaptive compliant trailing edge[C]. 52th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2016.
- [35] Miller E J, Lokos W A, Cruz J, et al. Approach for structurally clearing an adaptive compliant trailing edge flap for flight[R]. DFRC-E-DAA-TN26324, 2015.
- [36] Diodati G, Concilio A. Actuation needs for an adaptive trailing edge device aimed at reducing fuel consumption on a regional aircraft[C]. Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, 2013.
- [37] Arena M, Concilio A, Pecora R. Aero-servo-elastic design of a morphing wing trailing edge system for enhanced cruise performance[J]. Aerospace Science and Technology, 2009, 86: 215-235.
- [38] Noviello M C, Pecora R, Amoroso F, et al. Experimental shape reconstruction of a morphing wing trailing edge in simulated operative conditions[C]. 8th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering, 2017.
- [39] Concilio A, Dimino I, Pecora R. SARISTU: Adaptive trailing edge device(ATED) design process review[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021,34(7):187-210.
- [40] Moholt M, Benafan O. Spanwise adaptive wing[R]. NASA/ TM- 2017-213668, 2017.
- [41] Spivey D, Suh P. Spanwise adaptive wing[R]. NASA-N18000 4639, 2018.
- [42] Cheung K, Cellucci D, Copplestone G, et al. Development of mission adaptive digital composite aerostructure technologies (MADCAT) [R]. NASA 2017-4273, 2017.
- [43] Muhammed S P, Ajaj R M, Khan K A. A compliant polymorphing wing for small UAVs[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(10):2575-2588.
- [44] Navaratne R, Dayyani I, Benjamin K S W, et al. Development and testing of a corrugated skin for a camber morphing aerofoil [C]. 23rd AIAA/AHS Adaptive Structures Conference, 2015.
- [45] Yokozeki T, Sugiura A, Hirano Y. Development and wind tunnel test of variable camber morphing wing[C]. 22nd AIAA/ ASME/AHS Adaptive Structures Conference, 2014.
- [46] Kimaru J, Bouferrouk A. Design, manufacture and test of a camber morphing wing using MFC actuated smart rib [C]. 8th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering, 2017.
- [47] Elzey D M, Sofla A Y N, Wadley H N G. Shape memory-based multifunctional structural actuator panel[C]. Smart Structures and Materials 2002:Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, 2005.
- [48] Sun Jian, Du Linzhe, Scarpa F, et al. Morphing wingtip structure based on active inflatable honeycomb and shape memory polymer composite skin: A conceptual work[J]. Aerospace Science and Technology, 2011,111: 106541.
- [49] 吴斌,杜旭朕,汪嘉兴. 变体飞机智能结构技术进展[J]. 航空科学技术, 2022,33(12):13-30.
- Wu Bin, Du Xuzhen, Wang Jiaxing. Smart structure technology progress of morphing aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(12):13-30. (in Chinese)
- [50] Dale A S, Cooper J E, Mosquera A. Topology optimization & experimental validation of 0-u honeycomb for adaptive morphing wing[C]. 22nd AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference, 2014.
- [51] Aage N, Andreassen E, Lazarov B, et al. Giga-voxel computational morphogenesis for structural design[J]. Nature, 2017,550(7674): 84-86.
- [52] Tomohiro J, Hisaya A, Takamichi A, et al. Bio-inspired wing-folding mechanism of micro air vehicle(MAV) [J]. Artificial Life and Robotics, 2017, 22:203-208.
- [53] Pankaj V, Dorlikar S S P. Bird inspired flapping wing mechanism atlas generation[J]. Materials Today: Proceedings, 2023,77:1016-1022.
- [54] Song F, Yan Y, Sun J. Review of insect-inspired wing micro air vehicle[J]. Arthropod Structure & Development, 2023, 72: 101225.
- [55] Matthew K, Karl K, Henry W, et al. Development of the nano

- hummingbird: A tailless flapping wing micro air vehicle[C]. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2012.
- [56] Libonati F, Vellwock A E, Lelmini F, et al. Bone-inspired enhanced fracture toughness of fiber reinforced composites[J]. Scientific Reports, 2019,9: 3142.
- [57] Meng Liang, Shi Jianxiong, Yang Chen. et al. An emerging class of hyperbolic lattice exhibiting tunable elastic properties and impact absorption through chiral twisting[J]. Extreme Mechanics Letters, 2020,40:100869.
- [58] Snyder A D, Phillips Z J, Turicek J S, et al. Prolonged in situ self-healing in structural composites via thermo-reversible entanglement[J]. Nature Communications, 2022,13:6511.
- [59] 黄红岩, 苏力军, 雷朝帅, 等. 可重复使用热防护材料应用与研究进展[J]. 航空学报, 2020,41(12):1-35.
- Huang Hongyan, Su Lijun, Lei Chaoshuai, et al. Reusable thermal protective materials: Application and research progress [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020,41(12):1-35. (in Chinese)
- [60] 孟松鹤, 杨强, 霍施宇, 等. 一体化热防护技术现状和发展趋势[J]. 宇航学报, 2013,34(10):1295-1302.
- Meng Songhe, Yang Qiang, Huo Shiyu, et al. State-of-arts and trend of integrated thermal protection systems[J]. Journal of Astronautics, 2013,34(10):1295-1302. (in Chinese)
- [61] Jenkins D R. Protecting the body: The orbiter's thermal protection system, in space shuttle legacy[M]. Reston: AIAA, 2014.
- [62] Lockheed Martin Company. X-33: Phase 2[R]. NASA/ CR-1998-208192, 1998.
- [63] Blosser M L, Chen R R, Schmidt I H, et al. Advanced metallic thermal protection system development[R]. AIAA 2002-0504, 2002.
- [64] Mikula D F K, Holthaus M, Jensen T E, et al. X-37 flight demonstrator system safety program and challenges[R]. AIAA 2000-5073, 2000.
- [65] Paez C. The development of the X-37 re-entry vehicle[R]. AIAA 2004-4186, 2004.
- [66] Ghoshroy S. The X-37B: Backdoor weaponization of space[J]. Bulletin of the Atomic Scientists, 2015, 27:19-29.
- [67] Grantz A C. X-37B orbital test vehicle and derivatives[R]. AIAA 2011-7315, 2011.
- [68] Johnson S M. Thermal protection materials and systems: Past, present, and future[R]. NASA-ARC-E-DAA-TN9472, 2013.
- [69] 鲁芹, 姜贵庆, 罗晓光, 等. X-37B 空天飞行器轻质非烧蚀热防护新技术[J]. 现代防御技术, 2012,40(1):16-20.
- Lu Qin, Jiang Guiqing, Luo Xiaoguang, et al. Lightweight and non-ablation new TPS for X-37B aerospace vehicle[J]. Modern Defence Technology, 2012,40(1):16-20. (in Chinese)
- [70] Thierry P, Renaud B. CMC windward TPS and nose of the IXV vehicle: Full-scale manufacture, qualification, and integration [C]. 64th International Astronautical Congress, 2014.
- [71] Buffenoir F, Zeppa C, Pichon T, et al. Development and flight qualification of the C-SiC thermal protection systems for the IXV[J]. Acta Astronautica, 2016, 124: 85-89.
- [72] Mario C, Gandolfo D V, Teresa S M. Design, qualification, manufacturing and integration of IXV ablative thermal protection system[J]. Acta Astronautica, 2016, 124: 90-101.
- [73] Glass D. Ceramic matrix composite (CMC) thermal protection system (TPS) and hot structure for hypersonic vehicle[R]. AIAA 2008-2682, 2008.
- [74] Wuilbercq R, Ahmad A, Scanlon T, et al. Towards robust aerothermodynamic predictions for re-usable single-stage to orbit vehicle[R]. AIAA 2012-5803, 2012.
- [75] Eggers T. Numerical investigation on the potential of steam cooling for the Skylon spaceplane in hypersonic flow[C]. 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2012:1-10.
- [76] Varvill R, Bond A. Application of carbon fiber truss technology to the fuselage structure of the Skylon spaceplane[J]. Journal of the British Interplanetary Society, 2004, 57:173-185.
- [77] 马野. 云霄塔空天飞行器结构设计及结构改进思路[J]. 飞机设计, 2022,42(3):50-55.
- Ma Ye. A study about airframe design of the SKYLON and modification of airframe[J]. Aircraft Design, 2022,42(3):50-55. (in Chinese)
- [78] Hemsell M. Program on SKYLON and SABRE[C]. 64th International Astronautical Congress, 2013.
- [79] Satish K B, Oscar M M, Christian G, et al. Analysis and design of corrugated-core sandwich panels for thermal protection system of space vehicles[R]. AIAA 2006-1942, 2006.
- [80] 吴林志, 熊健, 马力, 等. 轻质夹层多功能结构一体化设计[J]. 力学与实践, 2012,34(4):8-18.

Wu Linzhi, Xiong Jian, Ma Li, et al. Integrated design of lightweight multifunctional sandwich structures[J]. Mechanics in Engineering, 2012, 34(4):8-18. (in Chinese)

[81] 陈立明,戴政,谷宇,等. 轻质多层热防护结构的一体化优化设计研究[J]. 力学学报, 2011, 43(2):289-295.

Chen Liming, Dai Zheng, Gu Yu, et al. Integrated optimization design of light-weight multilayer thermal protection structures [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2011, 43(2):289-295. (in Chinese)

Prospect of New Structure Technology for Flight Vehicle

Ma Ye, Song Shengju, Liu Yanfei

Research and Development Center of China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China

Abstract: With the improvement of aircraft design requirements, aircraft structure continues to develop in the direction of function integrated structure and smart structure, and the new structure technology of aircraft is the embodiment of the needs of aircraft structure development. Starting from the technical developing dimension of aircraft structural, the innovative concepts and ideas of aircraft structural design in recent decades are summarized and sorted out, and the research and judgment of the developing trend of airplane and aerospace aircraft structural design is formed. This paper introduces and analyzes the light/multifunctional structure, smart structure, morphing structure, bio-inspire material/structure, thermal protection/insulation and load-carrying integrated structure, and finally gives a technical summary of the developing trend of aircraft and space vehicle structure. These conclusions can provide meaningful reference for the subsequent development of flight vehicle structural design.

Key Words: flight vehicle structure; aircraft; space vehicle; developing trend